

## 蕹菜吸收和积累 Cd 和 Pb 能力的品种间差异\*

辛俊亮<sup>1,2</sup>, 黄白飞<sup>1,2</sup>, 杨中艺<sup>1</sup>, 袁剑刚<sup>1</sup>, 母养秀<sup>1</sup>

(1. 中山大学有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广东 广州 510275;  
2. 湖南工学院安全与环境工程系, 湖南 衡阳 421002)

**摘 要:** 选育和利用在受污染的土壤中可食部位污染物含量达到食品卫生标准的农作物品种, 即污染对策品种 (pollution-safe cultivar, 简称 PSC), 是降低污染物经食物链危害人类健康的有效手段。该研究以蕹菜为对象, 通过盆栽试验研究了 Cd、Pb 胁迫下不同蕹菜品种对 Cd 和 Pb 吸收积累的差异并探讨了筛选镉、铅污染对策品种 (Cd + Pb - PSC) 的可行性。结果表明: ①与对照相比, 无论是 Cd 还是 Pb 胁迫, 均未引起蕹菜茎叶生物量的显著下降, 相反促进了大部分品种茎叶生物量的增加, 表明蕹菜对土壤 Cd 和 Pb 胁迫有一定的耐性, 这可能掩盖土壤受 Cd 和 Pb 污染的情况而增加蕹菜受 Cd 和 Pb 污染的风险; ②在 Cd、Pb 胁迫下, 供试蕹菜品种茎叶 Cd、Pb 含量品种间差异均达到极显著 ( $P < 0.01$ ), 且第一茬与第二茬的茎叶 Cd、Pb 含量分别呈显著 ( $P < 0.05$ ) 和极显著 ( $P < 0.01$ ) 相关; ③在供试品种中, 有 2 个品种既是 Cd - PSC 又是 Pb - PSC, 可看作 Cd + Pb - PSC。这表明蕹菜茎叶吸收积累 Cd 和 Pb 的特性具有可再现性, 受遗传基因控制, 因而选育 Cd + Pb - PSC 是可行的。

**关键词:** 蕹菜; 镉; 铅; 品种间差异; 污染对策品种

中图分类号: X17 文献标志码: A 文章编号: 0529 - 6579 (2011) 03 - 0079 - 06

## Variations in the Accumulation of Cd and Pb Exhibited by Different Water Spinach Cultivars

XIN Junliang<sup>1,2</sup>, HUANG Baifei<sup>1,2</sup>, YANG Zhongyi<sup>1</sup>, YUAN Jiangan<sup>1</sup>, MU Yangxiu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Biocontrol // School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Department of Safety and Environmental Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China)

**Abstract:** In order to reduce the risk of pollutants entering the human diet from soils via agricultural products, breeding of pollution-safe cultivars (PSCs), that is, the cultivars whose edible parts accumulate specific pollutant at a low enough level for safe consumption when grown in contaminated soil, has been investigated as a practical method of minimizing the concentrations of heavy metals in crops. In this study, a pot experiment is conducted to investigate the variations of Cd and Pb accumulation in different water spinach cultivars. The results show that: ① shoot biomasses of water spinach don't significantly decrease but increase both under Cd and Pb exposure compared with the controls. This indicates that water spinach has a certain degree of Cd and Pb tolerance, which will increase the health risk from water spinach contaminated by soil Cd and Pb. ② shoot Cd and Pb concentrations vary significantly among the tested cultivars under Cd or Pb exposure ( $P < 0.01$ ) and correlations of Cd and Pb concentrations of all the cultivars between the first and second harvests are significant at  $P < 0.05$  level and at  $P < 0.01$  level, respectively. ③ The two cultivars, YQ and BGJ, are not only Cd-PSC but also Pb-PSC and may be considered as Cd + Pb - PSC. This implies that the characteristics of Cd and Pb accumulations in water spinach

\* 收稿日期: 2010 - 12 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20877104); 广东省自然科学基金资助项目 (021686)

作者简介: 辛俊亮 (1980 年生), 男, 讲师; 通讯作者: 杨中艺; E-mail: adszy@mail.sysu.edu.cn

are governed by gene (s) and are able to be well reproduced. Therefore, the selection of Cd + Pb-PSC is feasible in Cd and Pb-contaminated soil.

**Key words:** water spinach; cadmium; lead; cultivar variation; pollution-safe cultivar (PSC)

随着我国工业的发展,城市化进程的加快,特别是乡镇企业的发展,每年有大量的重金属污染物排放,使得农田土壤污染面积不断扩大。近年来,农业部通过调查发现,我国 24 个省(市)的城郊、污灌区、工矿企业等经济发展较迅速地区的 320 个重点污染地区中,有 60.6 万  $\text{hm}^2$  的农田生产的农产品污染物含量超标,约占调查总面积的 20%;其中重金属超标的面积约占污染物超标总面积的 80% 以上,尤其是镉、铅、汞、铜及其复合污染最为突出<sup>[1]</sup>。

在污染环境的诸多重金属中 Cd 和 Pb 受到的关注程度最高,因为 Cd 容易被作物吸收,并通过食物链威胁人类健康<sup>[2]</sup>,而 Pb 由于其用途广泛,污染最迅速<sup>[3]</sup>。尽管国内外开展了大量重金属污染土壤的修复技术研究<sup>[4]</sup>,但是修复过程耗时长,花费高,很难在发展中国家施行。尤其像中国人口众多,食物生产压力大,不可能大规模地进行土地休耕而用于污染修复,且大量农田尚未进行重金属污染调查,许多受重金属轻度污染的农田仍应用于农业生产。针对这种情况,有研究者提出应用污染对策品种 (pollution-safe cultivar, PSC) 能够有效降低农作物可食部位的重金属含量<sup>[5]</sup>。这个概念的提出是建立在农作物品种间吸收积累重金属存在差异的基础上,在水稻 *Oryza sativa* L.<sup>[5-6]</sup>、番茄 *Lycopersicon esculentum*<sup>[7]</sup>、大白菜 *Brassica pekinensis* L.<sup>[3]</sup>、长豇豆 *Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* L. 和蕹菜 *Ipomoea aquatica* Forsk. 等农作物中已有报道<sup>[8-10]</sup>。

事实上,农田受镉铅复合污染的情况普遍存在<sup>[8]</sup>。因此,具有应用价值的农作物 PSC 应该能同时低量积累 Cd 和 Pb,即 Cd + Pb - PSC。但目前涉及两种或两种以上重金属的 PSC 筛选研究极为有限,已发表的研究论文仅见于长豇豆<sup>[8]</sup>,作为极易受重金属污染的叶菜来说尚未见报道。

本研究是在 Wang 等<sup>[9]</sup>筛选蕹菜 Cd - PSC 研究的基础上,进一步扩大 Cd - PSC 的品种筛选,同时进行 Pb - PSC 的筛选,定量研究了蕹菜品种在 Cd 积累和 Pb 积累方面的相关性,试图筛选符合食品卫生标准的蕹菜 Cd + Pb - PSC,为应用 PSC 策略降低蕹菜受土壤 Cd 和 Pb 污染的风险提供可行性依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤来自广东省鹤山市农业科学研究所试验田,土壤经风干、压碎后过 5 mm 筛,备用。该土壤 pH 值为 5.68,有机质含量  $w = 1.84\%$ ,全氮、速效磷和速效钾含量分别为  $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $61.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $185.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总 Cd 和总 Pb 含量分别为 0.15 和  $32.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,低于《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ 332 - 2006)中规定的最大限值(Cd 和 Pb 分别为 0.3 和  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $\text{pH} < 6.5$ ),适于种植食用农作物,在本试验中作为对照土壤(CK)。根据以往的研究结果,本研究 Cd 污染土壤的设计 Cd 浓度为  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,配制方法为对照土壤与陈年 Cd 污染土壤(30 个月前混入  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  溶液,并曾在 10 个月前种植过油菜,总 Cd 含量为  $0.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )混合(质量比 1:1)而成,Pb 污染土壤设计 Pb 浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,配制方法为在对照土壤中添加  $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  溶液并充分混合。将配制好的土壤置于温室,浇水,平衡 2 周后,再次混匀,测得 Cd 土中总 Cd 含量为  $0.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,Pb 土中总 Pb 含量为  $111.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均超过了 HJ 332 - 2006 规定的最大限值,属于受 Cd 和 Pb 污染的土壤,不适合种植食用农产品。

供试蕹菜品种共 15 个,其中有 9 个是经 Wang 等<sup>[9]</sup>鉴定的 Cd - PSC,所有品种的名称及缩写见表 1。

表 1 15 个供试蕹菜品种  
Table 1 Experimental water spinaches

品种	缩写	备注	品种	缩写	备注
油青柳叶	YQ		广东柳叶	GDL	Cd-PSC
泰国白骨柳叶	TBL		港种特纯白	GTB	Cd-PSC
泰国空心菜	TGK		广东大叶白杆	GDB	Cd-PSC
台湾竹叶	TWZ		青骨柳叶	QGL	Cd-PSC
白梗鸡丝柳叶	BCJ		台湾 306 白骨柳叶	T306	Cd-PSC
港种白骨大叶	GBD		台湾 309 青骨鸡丝	T309	Cd-PSC
青茎正柳叶	QZL	Cd-PSC	强坤柳叶白骨	QLB	Cd-PSC
大叶纯白梗	DYB	Cd-PSC			

### 1.2 研究方法

试验于 2007 年 6 月在广东省鹤山市农业科学

研究所温室内进行。设置了对照、Cd 胁迫和 Pb 胁迫 3 个处理, 对照条件下的蕹菜只用来测定茎叶生物量, Cd、Pb 胁迫下的蕹菜则测定茎叶 Cd、Pb 含量和生物量。试验前将准备好的土壤分别装入口径 18 cm, 高 15 cm 的塑料盆中, 每盆装土 2.5 kg, 每处理均设计 3 次重复。Cd 胁迫下共种植 6 个品种 (YQ、TBL、TGK、TWZ、BGJ 和 GBD), Pb 胁迫下共种植 15 个品种, 有 6 个品种与 Cd 胁迫下种植的品种相同, 其余 9 个均是 Wang 等<sup>[9]</sup>研究中获得的 Cd-PSC。每盆播种子 8 粒, 于发芽后 1 周内间苗至每盆 4 株, 按生长需要适时浇水。发芽后第 15 天施肥, 每盆施复合肥 ( $m(N):m(P):m(K) = 15:15:15$ ) 3 g。

本研究关注的是土壤-植物-人类系统中重金属的转移途径。因此, 只采集蕹菜的可食部位—茎叶, 第一茬和第二茬分别在发芽后第 30 天和第 60 天进行采集。所有样本经自来水充分洗净后, 再用去离子水冲洗 3 次, 晾干后称鲜质量, 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒质量, 称干质量后再粉碎样品。称取 0.2 g 粉碎样品用微波消解仪 (MDS-6, 上海新仪微波化学科技有限公司) 消解, 消解试剂为 5 mL  $\rho = 65\%$  的  $HNO_3$  和 1.5 mL  $\rho = 30\%$  的  $H_2O_2$ 。消解液 Cd 含量用原子吸收仪 (Hitachi Z-5300, 日本) 测定, 并采用国家标准参比物质 (GBW-07605) 进行分析质量控制。

为了便于比较供试蕹菜品种对 Cd 或 Pb 胁迫的反应, 采用胁迫响应生物量 (Biomass Response to Stress, BRS)<sup>[8]</sup> 作指标。计算公式如下:

$$BRS = \frac{B_{\text{胁迫}} - B_{\text{对照}}}{B_{\text{对照}}} \times 100\%$$

其中  $B_{\text{胁迫}}$  和  $B_{\text{对照}}$  分别表示 Cd (或 Pb) 胁迫和对照下蕹菜品种茎叶生物量第一茬的平均值与第二茬的平均值之和 (以干质量计算)。

蕹菜茎叶重金属含量的安全性评价采用国际食品法典委员会 (CAC) 的评价标准, 其中叶菜 Cd 和 Pb 含量的最大限值分别为 0.2 和 0.3  $mg \cdot kg^{-1}$  (以鲜质量计算)。

数据分析采用 SPSS11.0 统计软件, 图形绘制采用 Excel 2003。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd、Pb 胁迫对蕹菜茎叶生物量的影响

无论在 Cd、Pb 胁迫处理下还是在对照条件下, 供试蕹菜品种的茎叶生物量均随着品种而变化 (表 2)。

表 2 供试蕹菜品种在对照和 Cd、Pb 胁迫下的茎叶生物量 (干质量, g)

Table 2 Dry shoot weights of the experimental water spinaches under control, Cd, and Pb exposure (g)

品种	对照	镉胁迫	铅胁迫
YQ	6.57 ± 0.42	7.32 ± 0.20	6.75 ± 0.33
TBL	5.82 ± 0.27	6.18 ± 0.29	5.22 ± 0.43
TGK	4.76 ± 0.45	4.45 ± 0.03	6.69 ± 0.49
TWZ	4.53 ± 0.20	4.60 ± 0.05	5.19 ± 0.37
BGJ	5.64 ± 0.35	7.39 ± 0.34	7.08 ± 0.56
GBD	4.06 ± 0.03	4.69 ± 0.20	5.59 ± 0.09
QZL	6.59 ± 0.50	-	7.00 ± 0.17
DYB	5.43 ± 0.55	-	5.80 ± 0.02
GDL	4.53 ± 0.22	-	5.02 ± 0.35
GTB	4.93 ± 0.07	-	5.99 ± 0.46
GDB	4.26 ± 0.14	-	6.23 ± 0.38
QGL	4.10 ± 0.35	-	6.41 ± 0.06
T306	3.28 ± 0.03	-	4.49 ± 0.19
T309	3.70 ± 0.20	-	4.02 ± 0.19
QLB	4.86 ± 0.54	-	5.00 ± 0.29
平均值	4.87 ± 0.25	5.77 ± 0.56	5.76 ± 0.24

在 Cd 胁迫下, 供试的 6 个蕹菜品种茎叶生物量的平均值为 5.77 g, 而在对照下, 6 个品种的茎叶生物量平均值为 5.23 g, 总体上与 Cd 胁迫下无显著差异 ( $P > 0.05$ )。但是, 除 TGK 外, 其余 5 个品种的茎叶生物量均在 Cd 胁迫下高于在对照条件下, 其中 BGJ 和 GBD 两个品种差异显著 ( $P < 0.05$ ), 而品种 TGK 在 Cd 胁迫下的茎叶生物量低于对照 ( $BRS < 0$ ), 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (图 1)。由此可见, 本试验所设计的 Cd 胁迫浓度并没有引起蕹菜茎叶生物量的显著下降, 相反促进了大部分品种茎叶生物量的增加, 说明蕹菜对土壤 Cd 胁迫有一定的耐性。这一特性可能掩盖土壤受污染的情况, 仅从茎叶生物量来判断, 生产者很难发现土壤中存在的 Cd 污染问题, 从而增加蕹菜受 Cd 污染的风险。

在 Pb 胁迫下, 供试的 15 个蕹菜品种茎叶生物量的平均值为 5.79 g, 而在对照下, 15 个品种茎叶生物量的平均值为 4.87 g, 显著低于 Pb 胁迫下的平均值 ( $P < 0.05$ )。除 1 个品种外, 其余 14 个品种的 BRS 值均呈正值 (图 1), 其中, QGL、TGK、GDB、GBD 和 T306 的 BRS 值大于 25%, 且这 5 个品种在 Pb 胁迫下的茎叶生物量显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于对照。只有 TBL 在 Pb 胁迫下的茎叶生物量低于对照, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。Pb 污染土壤中, Pb 含量达 111.4

mg·kg<sup>-1</sup>, 是对照土壤的近 3.5 倍, 但并未引起蔬菜茎叶生物量的显著下降, 相反促进了几乎所有品种茎叶生物量的增加。这表明, 蔬菜对土壤 Pb 胁迫也有一定耐性。这一特性同样可能增加蔬菜受 Pb 污染的风险。

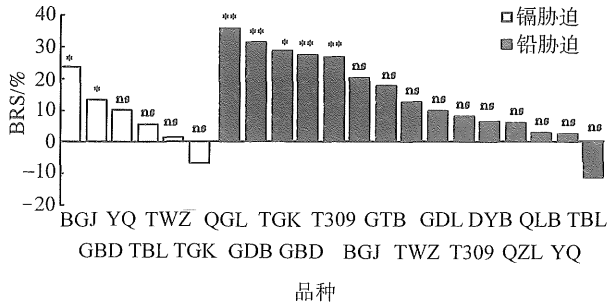


图 1 供试蔬菜品种的相对生物量

Fig. 1 Biomass response to stress (BRS) of the experimental water spinaches

注: ns、\* 和 \*\* 分别表示对照与 Cd 或 Pb 胁迫下茎叶生物量之间的差异不显著、在  $P < 0.05$  水平上显著和在  $P < 0.01$  水平上显著。

### 2.2 Cd、Pb 胁迫下蔬菜茎叶 Cd 和 Pb 含量的品种间差异

图 2 和图 3 分别给出了以鲜重为基础的各供试蔬菜品种茎叶 Cd 和 Pb 的含量。在 Cd 污染土壤中, 供试 6 个品种的第一茬和第二茬茎叶 Cd 含量范围分别是 0.108 ~ 0.239 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.104 ~ 0.207 mg·kg<sup>-1</sup>, 且方差分析结果表明, 品种间差异都达到极显著 ( $P < 0.01$ )。从两茬的结果来看, 品种 YQ、BGJ、TWZ 和 GBD 的茎叶 Cd 含量均未超出 CAC 标准, 可以看作典型的 Cd - PSC; TBL 均超出了 CAC 标准, 可以看作典型的 non-Cd-PSC; 经  $t$  检验, TGK 两茬茎叶 Cd 含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但是用 CAC 标准衡量, 该品种在第二茬出

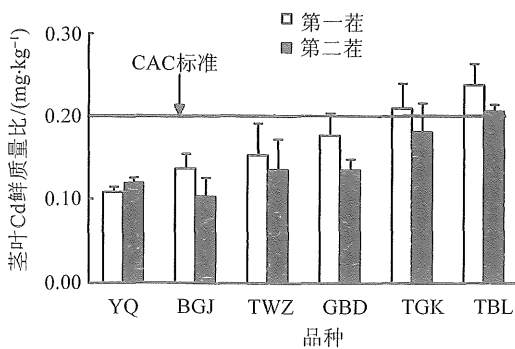


图 2 Cd 胁迫下供试蔬菜品种的茎叶 Cd 含量  
Fig. 2 Shoot Cd concentration of the experimental water spinaches under Cd exposure

现超标的情况, 因此, 从食品安全角度考虑, 该品种应归于 non-Cd-PSC。相关分析结果表明, 两茬茎叶 Cd 含量的相关系数为 0.865 ( $n = 6$ ), 在  $P < 0.05$  水平上有显著意义 (图 4a)。Wang 等<sup>[9]</sup>的研究结果也显示供试的 30 个蔬菜品种两茬茎叶 Cd 含量显著相关。这说明蔬菜对 Cd 的吸收积累特性是一个受基因控制且比较稳定的性状。

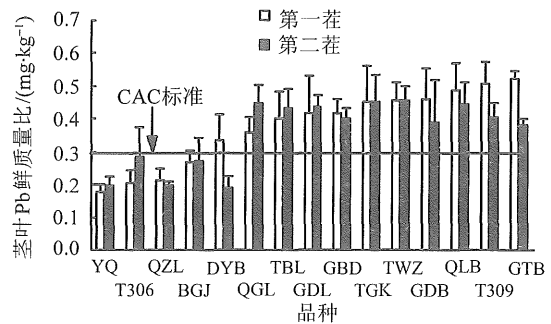


图 3 Pb 胁迫下供试蔬菜品种的茎叶 Pb 含量  
Fig. 3 Shoot Pb concentration of the experimental water spinaches under Pb exposure

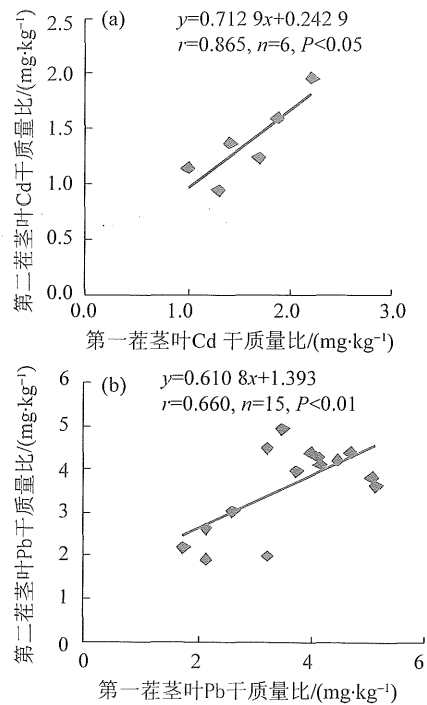


图 4 供试蔬菜品种第一茬与第二茬茎叶 Cd(a)、Pb(b) 含量相关性

Fig. 4 Relations of shoot Cd(a) and Pb(b) concentration of the experimental water spinaches between the first and the second harvests

在 Pb 胁迫下, 供试 15 个品种的第一茬和第二茬茎叶 Pb 含量范围分别是 0.177 ~ 0.523 和 0.187

$\sim 0.457 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 统计分析结果表明, 品种间差异均极显著 ( $P < 0.01$ )。品种 YQ、T306、QZL 和 BGJ 两茬的茎叶 Pb 含量均未超出 CAC 标准, 可以看作典型的 Pb-PSC, 而 YQ 和 BGJ 同时又是 Cd-PSC, 因此, 这两个品种可以看作 Cd + Pb - PSC; DYB 的第一茬茎叶 Pb 含量超出了 CAC 标准, 第二茬则未超出, 两茬表现不一致; 其余 10 个品种的两茬茎叶 Pb 含量均超出了 CAC 标准, 因此可以看作典型的 non-Pb-PSC。从两茬茎叶 Pb 含量的相关性来看 (图 4b), 相关系数  $r = 0.660$  ( $n = 15$ ), 在  $P < 0.01$  水平上有极显著意义。这一结果说明薹菜茎叶吸收积累 Pb 的特性也是一个比较稳定的性状, 可能也是受基因控制的。

根据 Wang 等<sup>[9]</sup>的研究结果, 品种 T306 和 QZL 可以看作 Cd-PSC。因此, 结合本次试验的结果, 共有 YQ、T306、QZL 和 BGJ 等 4 个品种被鉴定为 Cd + Pb - PSC。

### 3 讨论

#### 3.1 薹菜对 Cd 和 Pb 的耐性

本研究的结果不仅证明了薹菜是比较容易吸收积累重金属 Cd 和 Pb 的农作物, 在受污染或污染情况不明的农田土壤中种植薹菜的风险将很大, 而且还发现无论在 Cd 还是 Pb 胁迫下, 所有供试薹菜品种的茎叶生物量均未显著降低, 部分品种的茎叶生物量甚至显著增加。由此可见, 薹菜对 Cd 和 Pb 的毒害作用有一定的耐性, 所以即便薹菜种植在 Cd 和 Pb 污染的土壤上, 生产者也不能根据产量变化特征来判断薹菜是否受到 Cd 和 Pb 的污染, 这显然会增加薹菜产品受 Cd 和 Pb 污染的风险。同样, 相似的现象还存在于其他作物中, 如番茄<sup>[11]</sup>、玉米<sup>[12]</sup>、水稻<sup>[5]</sup>等, 这可能与植物对低重金属胁迫的适应性反应有关<sup>[13]</sup>。

#### 3.2 选育 Cd + Pb - PSC 的意义

据统计, 目前我国受镉、铅等重金属污染的耕地面积已近 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 约占总耕地面积的  $1/5$ <sup>[14]</sup>。由于人口压力较大, 这些受污染的农田仍有许多在用于农作物生产。例如, 沈阳市近郊蔬菜重金属检验结果表明, 大白菜 Pb 超标率为 100%, Cd 超标率为 58.3%; 黄瓜、番茄、菜豆中 Cd、Pb 含量也均有不同程度超标<sup>[15]</sup>。如果这些受污染的农田用于修复, 那么在较长一段时间内将不能用于农业生产, 况且对于那些污染情况不明的农田土壤来说, 则很难有针对性地开展修复工作。因此, 为降低农作物受土壤重金属污染的风险, PSC 的应用具有明

显的价值。

农田土壤受 Cd、Pb 复合污染的情况普遍存在<sup>[8,10]</sup>, 然而薹菜又很容易受到土壤 Cd、Pb 的污染<sup>[10]</sup>。值得注意的是, 本研究中筛选到了既是 Cd-PSC 同时又是 Pb-PSC 的 4 个薹菜品种。如果能证明这 4 个品种是 Cd + Pb - PSC 的话, 那么种植在受 Cd、Pb 复合污染或污染情况不明的农田中将会有效降低薹菜受 Cd、Pb 污染的风险。这将对保证薹菜产品安全有重要意义。

#### 3.3 薹菜 Cd + Pb - PSC 选育的可行性及今后的研究方向

在本试验中, 土壤 Cd 含量达到了  $0.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (接近 HJ 332 - 2006 最大限值的 2 倍), 供试薹菜品种中约有 1/3 品种第一茬和第二茬茎叶 Cd 含量超过了 CAC 标准。当土壤 Pb 含量达到  $111.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (略超过 HJ 332 - 2006 最大限值的 2 倍) 时, 15 个供试薹菜品种中两茬茎叶 Pb 含量均未超过 CAC 标准的品种只有 4 个。因此, 薹菜 Cd - PSC 并不一定同时是 Pb - PSC, 且在受 Cd 和 Pb 污染的土壤上种植薹菜, 一旦品种选择不当, 将会增加薹菜产品受 Cd 和 Pb 污染的风险。

有研究表明, 选择可食部位 Cd 积累能力较低的 Cd - PSC 是降低农作物受 Cd 污染风险的有效策略<sup>[16]</sup>。本研究结果表明, 对于薹菜来说, 现有常用品种中不仅存在着 Cd - PSC, 而且存在着 Pb - PSC, 比如本研究中品种 YQ、T306、QZL 和 BGJ 第一茬和第二茬茎叶 Cd、Pb 含量都在 CAC 标准的最高限值以下, 而且第一茬与第二茬的茎叶 Cd、Pb 含量之间是显著相关的, 说明 Cd 和 Pb 积累模式在不同生长时期是可重复的。进一步的研究还证实了在单一污染条件下同时具有 Cd 和 Pb 低积累能力的品种 (如 YQ 和 BGJ) 在复合污染条件下也表现出对两种金属的同时低积累特征<sup>[10]</sup>, 属于 Cd + Pb - PSC。由此推测, 供试薹菜品种中存在的既是 Cd - PSC 又是 Pb - PSC 的品种也有可能属于 Cd + Pb - PSC。上述研究结果为未来开展 Cd + Pb - PSC 选育的可行性提供了试验生物学依据。

然而, PSC 策略并不是解决农田土壤重金属污染问题的万能钥匙, 严格的环境监管和土壤污染普查对于确保食品安全来说是必不可少的。土壤改良, 比如向土壤中添加石灰和有机物料<sup>[17]</sup>, 也应该与 PSC 策略一起实施来减少土壤重金属对食物链的污染, 确保食品安全。

从本次试验的结果来看, 不同薹菜品种对 Cd、Pb 吸收积累的能力有很大差异。结合已经发表的

关于大白菜<sup>[3]</sup>、水稻<sup>[5]</sup>和长豇豆<sup>[8]</sup>等研究结果,可以得出这样的结论:农作物对 Cd 和 Pb 的吸收积累量是一种可遗传的性状,具有明显的遗传学基础,这是选育 PSC 的重要基础。关于农作物 PSC 的培育,目前在硬质小麦、马铃薯等农作物均已取得成功<sup>[16]</sup>。但是,为了培育高产优质的农作物 PSC,建立 PSC 育种这一新的育种技术架构,目前仍有许多研究工作需要开展,包括农作物低量积累 Cd 和 Pb 的机理以及遗传特性的研究,比如对食用部位 Cd、Pb 含量性状进行群体遗传分析、QTL 定位等,这将为论证不同作物 PSC 育种的可行性和方法奠定理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 孙波,周生路,赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 248 - 251.
- [2] 蔡保松,张国平. 大、小麦对镉的吸收、运送及在籽粒中的积累[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(3): 82 - 86.
- [3] LIU W T, ZHOU Q X, ZHANG Y L, et al. Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars [J]. J Environ Manage, 2010, 91: 781 - 788.
- [4] VANFRONSVELD J, COLPAERT J V, Van TICHELEN K K. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: Physico-chemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation [J]. Environ Pollu, 1996, 94(2): 131 - 140.
- [5] YU H, WANG J L, FANG W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice [J]. Sci Total Environ, 2006, 370: 302 - 309.
- [6] 刘志彦,田耀武,陈桂株. 复合污染重金属在水稻不同部位的积累转运[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2010, 49(2): 138 - 144.
- [7] 朱芳,杨中艺. 番茄吸收和积累 Zn 能力的品种间差异[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2006, 45(5): 97 - 101.
- [8] ZHU Y, YU H, WANG J L, et al. Heavy metal accumulations of 24 asparagus bean cultivars grown in soil contaminated with Cd alone and with multiple metals (Cd, Pb, and Zn) [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55: 1045 - 1052.
- [9] WANG J L, YUAN J G, YANG Z Y, et al. Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2 selected cultivars of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57: 8942 - 8949.
- [10] XIN J L, HUANG B F, YANG Z Y, et al. Responses of different water spinach cultivars and their hybrid to Cd, Pb and Cd-Pb exposures [J]. J Hazard Mater, 2010, 175: 468 - 476.
- [11] 朱芳,方炜,杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4071 - 4081.
- [12] 代全林,袁剑刚,方炜,等. 玉米各器官积累 Pb 能力的品种间差异[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 992 - 999.
- [13] FOY C D, CHANEY R L, WHITE M C. The physiology of metal toxicity in plants [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1978, 29: 511 - 566.
- [14] 万云兵,仇荣亮,陈志良,等. 重金属污染土壤中提高植物提取修复功效的探讨[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(4): 56 - 59.
- [15] 付玉华,李艳金. 沈阳市郊区蔬菜污染调查[J]. 农业环境保护, 1999, 18(1): 36 - 37.
- [16] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation [J]. Sci Total Environ, 2008, 390: 301 - 310.
- [17] 李梦梅,杨中艺,李海军,等. 有机物料对抑制菜心吸收镉的效果研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007, 46(6): 79 - 83.